

УДК 621.313.33

Яковлєв

Анатолій Іванович

доктор економ. наук, професор,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

РЕЗЕРВИ ЗНИЖЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЗБИТКІВ ПРИ ВИХОДІ З ЛАДУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТАХ

RESERVES FOR LOSSES DECREASE IN CASE OF TECHNOLOGICAL UNITS' ELECTRICAL EQUIPMENT FAILURE

Проаналізовані причини виходу з ладу електротехнічних засобів автоматизації у промисловому виробництві. Визначено вплив умов експлуатації асинхронних двигунів на кількісні характеристики їх надійності. Запропонована галузева сегментація ринку асинхронних електродвигунів.

Проанализированы причины выхода из строя электротехнических средств автоматизации в промышленном производстве. Определено влияние условий эксплуатации асинхронных двигателей на количественные характеристики их надежности. Предложенная отраслевая сегментация рынка асинхронных электродвигателей.

Analysis of the causes of electrical automation facilities failure in the industrial production. Influence of the asynchronous motors operation conditions on the quantitative characteristics of their reliability. Industry-based segmentation of the asynchronous motors market was proposed.

Ключові слова: резерви, збитки, електрообладнання, засоби праці, надійність, умови роботи, кількісні характеристики надійності, асинхронні двигуни, галузева сегментація ринку.

Ключевые слова: резервы, убытки материалы, средства труда, надежность, условия работы, количественные характеристики надежности, асинхронные двигатели, отраслевая сегментация рынка.

Key words: reserves, losses, materials, instruments of labor, reliability, operation conditions, quantitative characteristics of reliability, asynchronous motors, industry-based segmentation of market.

ВСТУП

Подальший розвиток економіки потребує створення високоякісної, конкурентоспроможної техніки. Одним із цих напрямів є досягнення високої

надійності засобів праці, в т.ч. у промисловому виробництві. Вихід з ладу засобів автоматизації, в т.ч. електротехнічних, які функціонують в системі керування технологічними агрегатами, призводять у багатьох випадках до їх зупинки. Це не тільки викликає необхідність ремонту складних технологічних агрегатів. Виходи з ладу електротехнічних засобів автоматизації призводить також до втрат прибутку, браку продукції та інших видів збитку.

В існуючій літературі наведені ряд визначень і сутності збитків. Однак ціла низка авторів, в т.ч. О.П. Антонюк [2], М.І. Бублик [1], Б.М. Данилишин [4] та багато інших зосереджуються на аналізі технологічних збитків, які не входять до предмету даного дослідження. Є ряд робіт по напряму, що розглядається в цієї статті, наприклад, [6–9]. Однак в них бракує конкретних рекомендацій, націлених на зниження конкретних видів збитків, пов'язаних з виходом з ладу електрообладнання у промисловому виробництві.

МЕТА РОБОТИ

Виходячи з вищевикладеного, мають велике значення зниження витрат в результаті виходу з ладу електротехнічних засобів автоматизації, що входять в систему управління технологічними агрегатами. Вони полягають у визначенні умов, в яких функціонує техніка, що аналізується, в конкретних видах виробництв, їх систематизації. І на цій основі визначення резервів скорочення величини відповідних збитків.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Теоретичною основою є праці науковців в галузі підвищення ефективності суспільного виробництва, принципу «витрати – вигіди», економічного аналізу. В практичному плані застосовані методи експерименту, статистичного аналізу, експертні методи.

РЕЗУЛЬТАТИ

Як показали результати проведених нами досліджень, асинхронні двигуни (АД) нерідко працюють у досить тяжких умовах, при незадовільному обслуговуванні або зовсім без якого-небудь догляду. Тому в

більшості випадків причинами відмов АД є невисока якість виготовлення і неправильне їхнє застосування (15-35% відмов), недоліки експлуатації - головним чином недостатній захист АД (35-50% відмов) або низька якість ремонту. У табл. 1 ми наводимо розподіл причин відмов АД на підприємствах машинобудівного комплексу м. Харкова. Данні були отримані за експертними оцінками працівників служб головного енергетика, які займаються експлуатацією і ремонтом АД.

Таблиця 1 – Розподіл причин відмов АД на підприємствах машинобудівного комплексу м. Харкова

Підприємства	Причини відмов АД, %			
	Низька якість виготовлення	Погана експлуатація	Неякісний ремонт	Інші
ВАТ «ХТЗ»	23	35	12	30
ВАТ «Укрелектромаш»	15	46	10	29
ВАТ «Електромашина»	18	44	15	23
ДП «Електроважмаш»	22	39	18	21
ДП «Протон»	33	36	22	9
СП «ХЕМЗ»	16	39	18	27
ВАТ «Турбоатом»	27	42	13	18
ВАТ «ХПЗ»	21	49	21	9
ВАТ «Автрамат»	23	38	23	16
ВАТ «Завод ім. Фрунзе»	17	46	25	12
ВАТ «Серп і Молот»	19	37	27	17
ВАТ «ХЗТСП»	26	38	23	13
ВАТ «Гідропривід»	25	39	21	15

Як видно з даних табл. 1, надійна робота АД може бути гарантована тільки за умови правильного їхнього вибору та застосування. По даним [6], до 30% відмов АД за першу тисячу годин роботи були викликані неправильним використанням двигунів за умовами навколишнього середовища. У середньому для всіх типів АД близько 7,5% відмов викликається неправильним вибором двигунів по потужності [6, с.130]. Закриті АД володіють значно більше високою надійністю і дають істотну економію відносно обслуговування. Деяке подання про відносні значення відповідних показників дає табл. 2, складена нами по літературними даними та результатами власного дослідження.

Таблиця 2 – Ефективність використання закритих конструкцій у відсотках до захищених виконань АД

Показники ефективності	Виконання АД	
	Захищене	Закрите
Маса	100	114
Вартість машини	100	122
Вартість ремонту	100	72
Потреба в обслуговуючому персоналі	100	71
Кількість відмов за 20000 год. роботи	100	68

Аналіз показує, що заміна захищеного виконання закритим особливо ефективна для АД малої потужності, де закриті виконання не супроводжується істотним збільшенням габаритів, маси і вартості, у той же час надійність АД, витрати на ремонт і обслуговування значно скорочуються.

Варто також наголосити, що значна кількість відмов АД викликається ще й тим, що проектувальники верстатів і встаткування часто не враховують властивості АД і вибирають для їхньої установки важкодоступні місця. Внаслідок цього порушується їхня вентиляція, що стає причиною підвищеного нагрівання та передчасного виходу з ладу обмотки статора.

Дослідженнями також встановлено, що на час безвідмовної роботи АД істотно впливає вологість навколишнього середовища. В ізоляційних матеріалах відбуваються процеси адсорбції і сорбції вологи, що значно знижує їхню електричну міцність. Особливо це позначається при недостатнім просоченні обмоток. Волога проникає в простір, незаповнений просочувальним складом, а відтіля дифундує у макро- і мікропорожнечі ізоляції. Наявність вологи може привести до зниження терміну служби змащення підшипникових вузлів на 25%. Це підтверджує і проведена класифікація відмов за часом року: зима - 17,2%, весна - 30,6%, літо - 24,8%, осінь - 27,45 [10, с.9]. Так, наприклад, за даними проведених досліджень [11] середньомісячна кількість відмов для вибірки в 1500 асинхронних АД на напругу 380В на протязі року коливається від 11,6 у серпні до 33,6 у березні, тобто залежно від вологості та температури коливається в 2,9 рази. Є й інші дані. Коефіцієнт кореляції між часом безвідмовної роботи АД і часом їхньої роботи на протязі доби за деякими оцінками становить $0,5 \pm 0,08$, тобто досить високий. При малому часі роботи протягом доби випадає роса на обмотці,

волога проникає в мікротріщини, що скорочує час безвідмовної роботи.

При видобутку, переробці, навантаженні та транспортуванні вугілля, руд і будівельних матеріалів відбувається інтенсивне утворення пилу. Великі часточки пилу швидко осаджуються і покривають стіни приміщень, корпуса машин і електродвигунів, погіршуючи їхнє охолодження. Дрібні часточки розміром 25 мкм тривалий час можуть перебувати у зваженому стані і переносяться на значні відстані. Проникаючи усередину корпусів електродвигунів, пил знижує поверхневий опір ізоляційних деталей і їх дугостійкість, забруднює змащення і сприяє появі абразивного зношування рухливих з'єднань. Наявність на обмотці статора вугільного і породного пилу товщиною 0,9мм приводить до підвищення її перегріву приблизно на 10°C , тобто до скорочення ресурсу обмотки. У промисловій атмосфері є агресивні гази (сірководень, окису сірки і азоту і т. ін.), що шкідливо впливають на застосовувані в електродвигунах матеріали. Розчиняючись у воді або в крапельках конденсату, що випав, деякі із цих газів утворюють кислоти, які прискорюють руйнування ізоляційних матеріалів і корозію металів. Швидкість атмосферної корозії при відносній вологості повітря 7% становить для вуглецевих і слабовуглецевих сталей і чавуну - 200 мкм/рік; цинку - 50; олова і міді - 12; алюмінію - 8; свинцю 4 мкм/рік [7, с.7]. При наявності високої відносної вологості повітря швидкість корозії підвищується. Так, у порівнянні з 70% відотною вологістю при 97%-ій вона підвищується в 7 разів, а при досягненні відносної вологості 100% - в 9 разів. На багатьох хімічних виробництвах, а також у виробітках шахт води мають кислу реакцію, під впливом якої корозія відбувається особливо інтенсивно. Для електродвигунів, які живляться від повітряних ліній електропередач, через вплив грозових розрядів середньомісячне число пробоїв обмоток у грозові місяці збільшується приблизно в 1,7 рази [7, с.8]. У табл. 3, складеної нами по даним [2-5, 7], приводяться показники, що дозволяють оцінити вплив різних зовнішніх факторів на відносну кількість відмов АД загальнопромислового виконання за період спостереження 8-12 тис. год.

Таблиця 3 - Вплив умов експлуатації на потік відмов АД

Характер умов експлуатації АД	Показники			
	Загальне число АД, %	Число відмов, %	Частка відмовивших АД, %	Загальне число відмов, %
Нормальні умови експлуатації ($t_0 \leq 350^\circ\text{C}$ і задовільне охолодження АД)	20,5	12,4	2,5	12,9
Бризки рідини та високий вміст часток металевого і абразивного пилю	65,5	20,6	13,5	68,8
Перешкоди для охолодження АД (ніша, кожух і т.п.)	8,5	19,3	1,6	8,3
Агресивне середовище (лужна та кислотна)	2,3	53,5	1,25	6,2
Підвищена температура навколишнього середовища (більше 350°C)	3,2	23,5	0,75	3,8
Усього	100	-	19,6	100

Існуюча у теперішній час практика припускає детальний поділ умов експлуатації електроустаткування по ступенях жорсткості. Установлено 15 ступенів жорсткості для позитивної температури, 9 - для негативної, 8 - для відносної вологості повітря, 20 - для вібраційних навантажень, 4 - для багаторазових ударних навантажень і т. ін. [7-9, 10]. Така велика розмаїтість умов експлуатації, на нашу думку, не має великої практичної цінності для досягнення цілей даної роботи. Ми пропонуємо встановити значно меншу кількість варіантів умов експлуатації електродвигунів, що повною мірою може кореспондуватися з виділенням сегментів ринку асинхронних двигунів і, саме головне, буде мати прикладне значення для більш точного визначення експлуатаційних витрат.

Наприклад, галузева сегментація ринку асинхронних електродвигунів припускає наявність таких сегментів як машинобудування, сільське господарство, транспорт, добувні галузі, металургія, хімічна промисловість і т. ін. Навіть простий перелік сегментів ринку явно відображає досить різні умови експлуатації і, відповідно, різні величини витрат. Аналіз структури капітально відремонтованих АД протягом року наочно показує нерівномірність їхніх відмов по галузях промисловості: будівництво - 50%, видобувна - 30%, машинобудування - 20%, чорна металургія - 13%, хімічна

промисловість - 9% [35, с.3].

Нами пропонується для асинхронних електродвигунів установити 6 класів умов експлуатації (і, відповідно, сегментів ринку) виходячи, по-перше, з умов що найбільш різко відрізняються і, по-друге, виходячи із сегментів ринку з найбільшою потребою в досліджуваній техніці: *A* – машинобудування, *B* – хімічна промисловість, *C* – металургія, *D* – сільське господарство, *E* – міський електротранспорт, *F* – видобувна промисловість. У табл. 4 ми наводимо дані по розподілу відмов окремих елементів двигунів у різних галузях промисловості, привівши їх до запропонованим нами класам умов експлуатації (сегментам цільового ринку) даної техніки. Наведені дані в розрізненому виді були опубліковані в різних роботах [7 – 11].

Таблиця 4 - Розподіл відмов асинхронних електродвигунів при їхній експлуатації в різних сегментах ринку

Електродвигуни і їхні елементи	Сегменти цільового ринку					
	A	B	C	D	E	F
Кількість спостережуваної вибірки електродвигунів	2734	807	528	495	292	631
Загальна кількість двигунів, що раптово відмовили, штук	492	201	143	109	67	183
Загальна кількість двигунів, що раптово відмовили, %	18%	25%	27%	22%	23%	29%
Розподіл відмов по елементах АД потужністю до 100 кВт, %						
Обмотка статора	41,4	49,2	73,5	46,3	54,2	74,6
Підшипниковий вузол	37,3	35,0	15,8	39,1	40,1	14,7
Ротор	2,8	2,5	1,0	1,9	0,5	0,8
Коробка виводів	3,1	2,5	1,9	4,9	1,7	3,5
Система охолодження (вентилятор)	4,9	5,0	3,9	2,5	1,1	2,2
Вал (включаючи шпонковий вузол)	7,1	4,6	1,2	2,8	1,0	2,4
Інші деталі	3,4	1,2	2,7	2,5	1,4	1,8

Дані, наведені в табл. 4, дозволяють зробити ряд важливих висновків і узагальнень. Є очевидним, що розподіл відмов електродвигунів істотно залежить від умов їхньої експлуатації і коливається в досить широких межах (відмова обмотки статора - від 41 до 75%, підшипникового вузла - від 15 до 40%, вентилятора - від 1 до 5% і т. ін.). Відмови обмотки статора для асинхронних двигунів є домінуючими, особливо це стосується двигунів, що працюють в умовах гірничодобувної промисловості. Значна частка відмов доводиться також на підшипниковий вузол. Спільно зі статорною обмоткою

ця частина електродвигуна приймає на себе левову частину всіх відмов - від 80 до 90% всіх відмов. Дослідження показують, що поліпшення умов експлуатації двигунів приводять до зменшення частки відмов обмотки статора і збільшенню частки відмов підшипників: при експлуатації в хімічній промисловості в порівнянні з гірничодобувної частка відмов обмотки статора зменшилася з 91 до 49,2%, а частка відмов підшипникового вузла збільшилася з 4,7 до 35%.

Дослідження показників надійності дозволяє визначити вузли електродвигунів ,які мають найбільшу кількість пошкоджень, що є інноваційною базою вдосконалювання конструкцій асинхронних електродвигунів. У табл. 5 наведені дані по внутрішніх причинах відмов електродвигунів, що працюють в умовах гірничорудної промисловості (клас умов експлуатації F). Під спостереженням перебувало 500 електродвигунів, установлених на об'єктах вугільної промисловості.

Наявність внутрішніх причин відмов асинхронних двигунів (табл. 3.3.2) викликана певними зовнішніми причинами, до яких, на наш погляд, варто віднести: влучення усередину двигунів відкритого виконання разом з повітрям пилу і інших механічних домішок; влучення води при очищенні технологічного встаткування струменями зі шлангів; сильною вібрацією двигунів через сильну вібрацію робочої машини; недостатньою твердістю фундаменту; збіг власних частот електродвигуна і робочої машини; недбалого центрування та поганого закріплення двигуна на фундаменті; невідповідність двигуна умовам роботи на даному встаткуванні; відсутність або загрублення температурного захисту; наявність великих радіальних навантажень на вал двигуна і т. ін. Як показали результати наших досліджень, значна частка відмов двигунів виникає з вини обслуговуючого персоналу (до 50%). При цьому капітального ремонту вимагають всі електродвигуни, які мають відмови обмотки статора. Такого роду відмови вимагають стаціонарних умов ремонту і істотних капіталовитрат. Відповідні узагальнення у цьому напрямку наведені у табл. 5.

Таблиця 5 – Розподіл внутрішніх причин відмов електродвигунів, що працюють в умовах вугільної промисловості

Причина відмови	У відмов	Розподіл, %		
		По всім АД	АД, що відмовили	По АД, що потребують капітального ремонту
Виткове замикання	75	15,0	16,9	20,2
Міжфазне замикання	13	2,6	2,9	3,5
Корпусне замикання	5	1,0	1,1	1,4
Зниження опору ізоляції обмотки	62	12,4	14,0	-
Обрив ланцюга у фазі	1	0,2	0,2	0,3
Замикання виткової ізоляції:				
- через заклинювання підшипників або ротора	7	1,4	1,6	1,9
- через роботу на двох фазах	48	9,6	10,8	12,9
- через перегрів частими пусками, заклинювання робочої машини	214	42,8	48,2	57,6
- через поломку вентилятора	7	1,4	1,6	1,9
Заклинювання підшипникових вузлів	4	0,8	0,9	-
Поломка вентилятора	7	1,4	1,6	-
Поломка валу	1	0,2	0,2	0,3
Двигуни не мають дефектів і ушкоджень	56	11,2	-	-

Кількісні значення інтенсивності раптових відмов λ стосовно до електродвигунів у цілому і до їх окремих складових елементів представлені нами в табл. 6 При розрахунку значення λ ми виходили з посилки, що в середньому протягом року кожний електродвигун працює 2500 годин. Така величина річного фонду роботи електродвигуна підтверджується також результатами досліджень, проведених рядом інших авторів. Значення інтенсивності відмов по електродвигуні в цілому, наведене в табл. 6, являє собою сумарну інтенсивність відмов всіх складових даного виробу.

Таблиця 6 – Інтенсивність раптових відмов λ асинхронних

електродвигунів і їхніх елементів у різних сегментах ринку

Електродвигуни і їхні елементи	Сегменти цільового ринку					
	A	B	C	D	E	F
Кількість спостережуваної вибірки електродвигунів	2734	807	528	495	292	631
Загальна кількість двигунів, що раптово відмовили, штук	492	201	143	109	67	183
По електродвигуні в цілому, λ (10^{-5} , 1/година)						
Асинхронні електродвигуни	7,198	9,963	10,833	8,808	9,178	11,601
По окремих елементах електродвигуна, λ (10^{-5} , 1/година)						
Обмотка статора	2,970	4,902	7,962	4,078	4,974	8,654
Підшипниковий вузол	2,685	3,487	1,712	3,444	3,680	1,705
Ротор	0,202	0,249	1,083	0,167	0,046	0,093
Коробка виводів	0,223	0,249	0,206	0,432	0,156	0,406
Система охолодження (вентилятор)	0,353	0,498	0,422	0,220	0,101	0,255
Вал (включаючи шпонковий вузол)	0,511	0,458	0,130	0,247	0,0918	0,278
Інші деталі	0,243	0,119	0,292	0,220	0,128	0,209

З достатнім ступенем точності за стандартні умови експлуатації асинхронних електродвигунів загально промислового виконання можна прийняти умови машинобудівних галузей (клас умов експлуатації «А»). У табл. 3.3.7 ми наводимо значення такого роду коефіцієнтів K_{λ} , розрахованих з використанням даних табл. 3.3.6. В ній ми наводимо значення K_{λ} тільки по двох позиціях: по двигуні в цілому, де концентруються всі види відмов і, відповідно, всі сумарні витрати на їхнє усунення; по обмотці статора, як носію підвищених витрат, тому що практично всі відмови обмотки статора вимагають складного (капітального) ремонту двигуна.

Таблиця 7 – Значення коригувальних коефіцієнтів K_{λ} при визначенні витрат на усунення раптових відмов асинхронних у різних сегментах ринку

Електродвигуни і їхні елементи	Значення K_{λ} в окремих сегментах цільового ринку					
	A	B	C	D	E	F
Двигун у цілому, $K_{\lambda}^{ов}$	1,000	1,384	1,505	1,224	1,275	1,612
Обмотка статора, $K_{\lambda}^{обм}$	1,000	1,651	2,681	1,373	1,675	2,914

Такий висновок підтверджується також результатами проведених раніше досліджень, у яких досить переконливо доведена наявність прямого зв'язку між умовами роботи техніки і необхідними витратами для забезпеченні відповідних умов експлуатації. Дослідження показують, що на

надійність АД досить істотно впливає також частота їхніх включень. При частих включеннях або реверсах швидше руйнуються сепаратори підшипників, в обмотках виникають значні динамічні зусилля від пускових струмів, а також комутаційні перенапруги, що досягають значної величини. За результатами вимірів числа пусків і їхньої тривалості (тобто часу розгону АД до номінальної швидкості), проведених приблизно на 3000 АД, установлених на 32 типах устаткування, показали, що величина обмірюваних параметрів коливається в широких межах: число пусків у годину - від 0,25 до 518, тривалість пуску - від 0,11 до 2,76 с.[5, с.11]. Відповідним чином змінюється і кількість відмов АД. У табл. 8 ми наводимо дані про частоту включень АД на різному встаткуванні і відсоток відмов АД за рік експлуатації, які отримані на основі узагальнення наявних даних [10], а також власних досліджень автора.

Таблиця 8 – Залежність кількості відмов АД від частоти їхніх пусків

Найменування встаткування	Середня частота включень, 1/ч	Кількість відмов АД, % від установлених
Намотувальні верстати	100	30,0
Металорізальні верстати	60	26,0
Ковальсько-пресове встаткування	140	38,7
Ливарне встаткування	30	34,4
Транспортери	6	24,0
Бігуни	1,25	17,6
Вентилятори	0,05	12,7
Насоси	0,05	11,2

ВИСНОВКИ

Враховування наведених резервів покращення використання аналізуємих електротехнічних виробів сприятиме підвищенню ефективності їх експлуатації і відповідно зростанню ефективності промислового виробництва і національної економії в цілому.

Література

1. Бублик М.І. Техногенні збитки у національному господарстві: економічне оцінювання та засади державного регулювання – Львів : вид-во Львівської політехніки, 2015. – 420с.
2. Антонюк О.П. Прогнозування обсягів економічного відшкодування наслідків техногенного забруднення криворізького регіону / О.П. Антонюк, І.М. Пістунов – Дніпропетровський НГУ, 2013. – 118 с.
3. Временна типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды – М. : Экономика, 1986. – 93с.
4. Данилишин Б.М. Природо-техногенні катастрофи: проблеми економічного аналізу та управління / Б.М. Данилишин – К. : НІЧ ЛАВА, 2001. – 260 с.
5. Методика розрахунку розмірів відшкодування збитків, які заподіяні державі в результаті наднормативних викладів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 10.12. 2008р. № 639 / Офіційний вісник України. – офіц. вид. від 02.02. 2009р. – №5. – С. 120-151.
6. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике/ Гук Ю. Б.: Учебник – пособие для вузов. – Л. Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1990 – 208 с.
7. Сердюк Б.М., Салоїд С.В., Лещук А.А. Розрахунок енергетичного збитку підприємства. http://www.nbu.gov.ua/ejournals/PSPE/2010_3/Serduk_310.htm.
8. Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. – М.: Экономика, 1989. – 149с.
9. Яковлев А.І. Визначення витрат на виробництво та ціни засобів праці з урахуванням їх якості / А.І. Яковлев / Економіка, фінанси, право. – К. : Аналітик, №8, 2014. – С. 7-10.

10. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. - М.: Знание, 1986.- 56с.

11. Эксплуатационная надежность шахтных взрывобезопасных электродвигателей напряжением до 1000В/ В.И. Шуцкий, Л.А. Плащанский, И.А. Сливаев и др.- Изв. Вузов. Горн. журнал.- 1986.- №7.- с.119-123.